

05-005

WIND ENERGY REVIEW: GLOBAL IMPACT, CHALLENGES AND BARRIERS FOR ITS INTEGRATION IN ELECTRICAL SYSTEMS

Gil García, Isabel C. ⁽¹⁾; García-Cascales, M. Socorro ⁽²⁾; Molina García, Ángel ⁽³⁾

⁽¹⁾ Escuela de Ciencias Técnicas e Ingeniería. Universidad UDIMA, ⁽²⁾ Dpto. Electrónica, Tecnología de Computadoras y Proyectos. Universidad Politécnica de Cartagena. Murcia, ⁽³⁾ Dpto. Ingeniería Eléctrica Universidad Politécnica de Cartagena. Murcia

Wind energy, recognized as renewable energy, clean, ecological and inexhaustible, capable of reducing energy dependence and allied against climate change, has developed rapidly in recent years; promoted by renewable integration policies.

In this field, this work presents an overview of the state of the art of global wind energy, comparing and classifying the variables of research: global statistics of the electricity generated, the installed-accumulated wind capacity and classification by geographical areas. Comparison of the onshore and offshore wind capacity including the ranking of countries and the classification by marine areas. The wind scenarios of the European Union and the rest of the main countries are detailed, as well as short-term forecasts and European targets for 2020-2030.

The advanced technology and the gradual reduction of costs, validate wind energy as a competent primary energy source, for its integration with electrical systems, despite this there are barriers to take into consideration: technological, use of the wind resource, integration, social, environmental and educational; important to overcome to achieve energy goals by expanding wind visibility as a source of energy in the energy mix.

Keywords: *Wind Energy; onshore wind; offshore wind; wind energy barriers*

REVISIÓN DEL RECURSO EÓLICO: IMPACTO GLOBAL, RETOS Y BARRERAS PARA SU INTEGRACIÓN EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS

La energía eólica, reconocida como energía renovable, limpia, ecológica e inagotable, capaz de reducir la dependencia energética y aliada contra el cambio climático, se ha desarrollado aceleradamente en los últimos años; promovida por políticas de integración de renovables.

En este ámbito, este trabajo presenta un panorama del estado del arte de la Energía Eólica mundial, comparando y clasificando las variables de la investigación: Las estadísticas globales de la electricidad generada, la capacidad eólica instalada-acumulada y la clasificación por áreas geográficas. Comparativa de la capacidad eólica onshore y offshore incluyendo el ranking de países y la clasificación por áreas marinas. Se detallan los escenarios eólicos de la Unión Europea y del resto de los principales países, así como los pronósticos a corto plazo y los objetivos europeos para el 2020-2030.

La avanzada tecnología y la reducción paulatina de los costes, validan a la energía eólica como una fuente de energía primaria competente, para su integración con los sistemas eléctricos, a pesar de esto existen barreras a tener en consideración: tecnológicas, de aprovechamiento del recurso eólico, de integración, sociales, ambientales y educativas; importantes de superar para lograr los objetivos energéticos ampliando la visibilidad eólica como fuente de energía en el mix energético.

Palabras clave: *Energía Eólica; Eólica onshore; Eólica offshore; barreras energía eólica*

Correspondencia: Isabel C. Gil García isabelcristina.gil@udima.es



©2019 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introducción

El origen limitado de los combustibles fósiles, la dependencia energética y el propósito imperioso de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero conducen a la necesidad de la transición global hacia las energías renovables (Hoehne C.G. & Chester M.V, 2017; Zerta. M, 2008). En muchos países, esta revolución energética ha sido impulsada y apoyada por los gobiernos, organizaciones internacionales y específicas de energía, cruzando los límites de las comunidades científicas y alcanzando un impacto positivo en la aceptación pública. El año 2017 culminó con records para las energías renovables. Se produjo el mayor incremento en la capacidad global, alcanzando la cifra de 2.180 GW de capacidad total, de las cuales el 53 % pertenecen a la energía hidráulica y el 24 % a la energía eólica (onshore + offshore) (Renewable Energy Policy Network for the 21st Century [REN21], 2018). En lo que respecta al recurso eólico, éste continuó con su ritmo de crecimiento ascendente también durante el año 2017, tanto en MW añadidos al global acumulado como en electricidad generada. Esta tendencia creciente en la integración eólica se ha visto favorecida por la reducción paulatina de costes, así como un entorno cada vez más maduro: innovaciones tecnológicas graduales, mejoras considerables en la cadena de suministro, reducción de la prima de riesgo, mayor cualificación de desarrolladores y operadores y un gran volumen de mercado. Varios fabricantes anunciaron producir aerogeneradores de más de 10 MW. A nivel global, 13 países (europeos y americanos) alcanzaron el 10% o más de su consumo de electricidad con energía eólica durante 2017. La energía generada durante el año 2016 alcanzó la cifra de 916,3 TWh; estimándose que durante 2017 esta cifra ascendió a 1.430 TWh, según fuentes de IEA Wind. En lo que respecta a la energía eólica offshore, se alcanzó su mejor año de la historia, con un incremento del 67% con respecto al año 2016. (International Energy Agency Wind [IEA WIND], 2018; Global Wind Energy Council [GWEC], 2018).

Atendiendo a este ritmo ascendente de integración de renovables en los sistemas eléctricos, principalmente basado en los recursos eólico y solar, el objetivo principal de este trabajo es presentar una panorámica detallada del estado del arte del recurso eólico a nivel mundial, estructurado en los siguientes apartados: (i) estadísticas de la energía eólica, (ii) escenarios eólicos de la Unión Europea y del resto de los principales países, (iii) pronósticos a corto plazo, (iv) barreras a vencer en la industria eólica y (v) conclusiones.

2. ESTADÍSTICAS ENERGÍA EÓLICA 2017

La capacidad eólica acumulada globalmente a 31 de diciembre del 2017, incluyendo los dos tipos de tecnologías: on-shore y off-shore, asciende a 539.123 MW. La capacidad eólica instalada en 2017 representó el 9,85 % de la capacidad de energía eólica acumulada global. Aunque la capacidad total está aumentando, la tasa de crecimiento de Instalaciones anuales ha disminuido en comparación con 2016, ver Figura 1.

La evolución del sector eólico globalmente de la última década ha sido claramente ascendente, tanto en nuevos MW añadidos a la capacidad total como a la energía eléctrica generada a partir de parques eólicos; y se espera que esta tendencia creciente se mantenga en cuanto al número de proyectos de nuevos parques eólicos. En el año 2017, se ha producido un crecimiento del 460,4 % con respecto al año 2007, y no se ha producido ningún retroceso durante este periodo. En las estadísticas por áreas geográficas, Asia lidera el mercado con China al frente con una capacidad de 204.658 MW, seguidos de Europa y Norte América con 170.621 MW y 103.907 MW respectivamente. En la última década las tres áreas geográficas han tenido una evolución ascendente paulatina, excepto Asia que durante los años 2013-2015, la inclusión en el mercado eólico fue más abrupta.

Distinguiendo entre eólica on-shore y off-shore, la clasificación cambia sustancialmente. En cuanto a la tecnología on-shore, Asia continúa líder con un 41% del total, seguidos por Europa y Norte América con un 31% y 21% respectivamente, ver Figura 2. Sin embargo, la panorámica en tecnología eólica off-shore difiere en grandes proporciones: Europa encabeza la clasificación con 15.838 MW de capacidad total, representando un 85 % del total, cifra destacada por los parques eólicos marinos del mar del norte.

2.1 CAPACIDAD EÓLICA. ON-SHORE

La capacidad acumulada on-shore a finales del 2017 asciende a 494.821,4 MW. La República popular de China ocupa la primera posición del ranking con 161.420 MW fortaleciendo su posición con respecto a periodos anteriores y muy por encima del resto de países, Estados Unidos (87.514 MW), Alemania (50.469 MW), India (32.849 MW) y España (22.983 MW) continúan la clasificación Ver Figura 3. Cabe destacar que, a finales de 2017, nueve países tenían más de 10.000 MW de energía eólica almacenada.

Figura 1. Comparación energía Eólica acumulada, instalada y generada.
Fuente: International Renewable Energy Agency [IRENA], 2018. Elaboración propia.

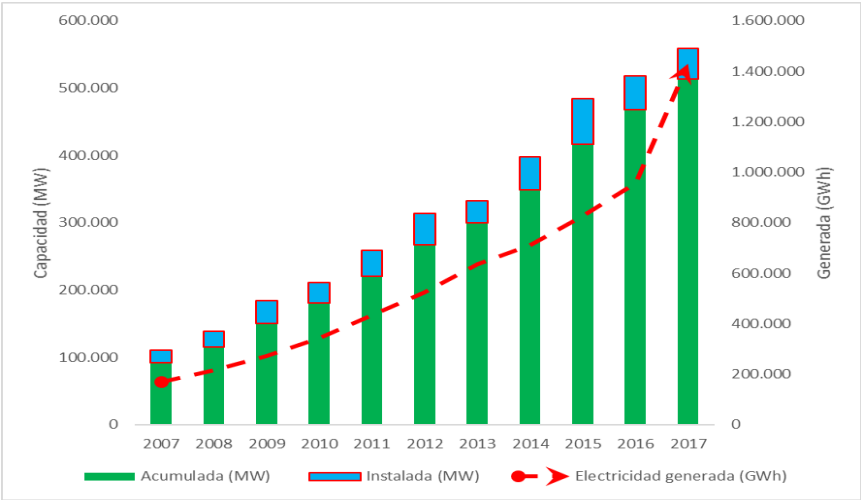


Figura 2. Comparación capacidad Eólica onshore acumulada en MW, por áreas geográfica.
Fuente: IRENA, 2018. Elaboración propia

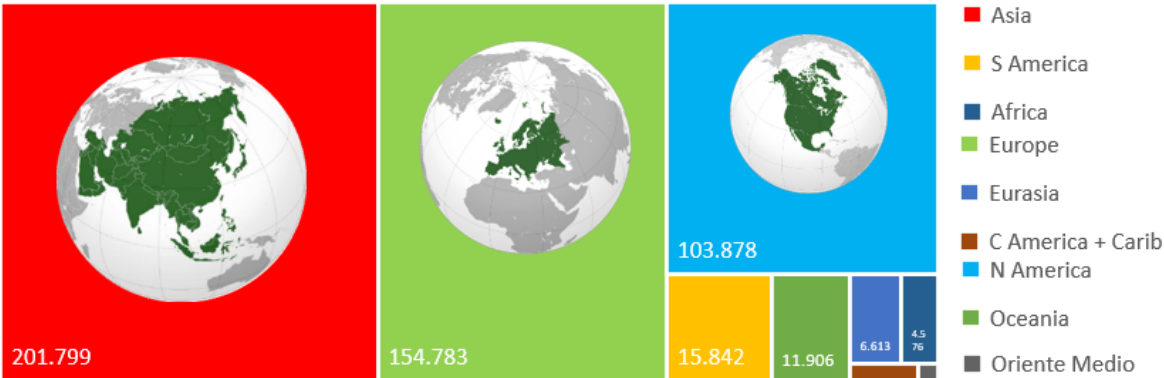
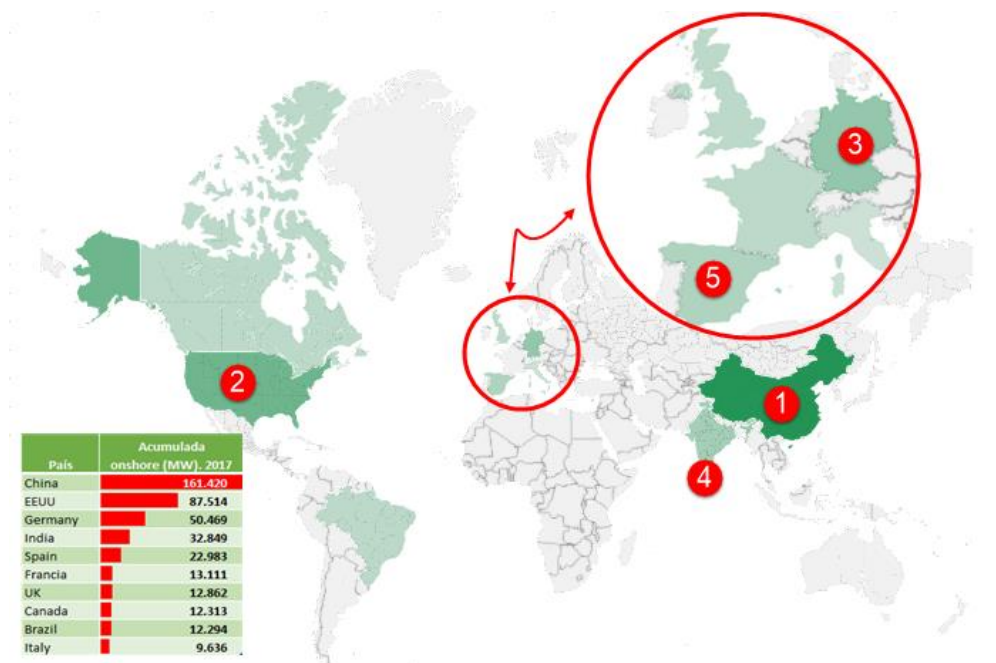


Figura 3. Clasificación de capacidad eólica on-shore acumulada en MW por países.
Fuente: IRENA, 2018. Elaboración propia



Considerando exclusivamente la capacidad eólica instalada en tierra a nivel mundial solamente durante el año 2017, ésta asciende a 41.714 MW. La República popular de China ocupa la primera posición con 13.917 MW muy por encima del resto de países, Estados Unidos (6.157 MW), Alemania (5.009 MW), India (4.148 MW), Brasil (2.170 MW), Reino Unido (1.938 MW) y Francia, Turkia, Sur África e Irlanda continúan la clasificación.

2.2 Capacidad Eólica. off-shore

La capacidad eólica marina acumulada a nivel global asciende a 18.726 MW, a finales del año 2017. Aunque el crecimiento ha sido constante, se observa que sólo cuatro países tienen instalada una potencia acumulada offshore de más de 1.000 MW: Dinamarca, China, Alemania y Reino Unido, por lo tanto, son principales responsables del crecimiento mundial.

El Reino Unido ocupa la primera posición en el ranking de países (6.975 MW), le siguen Alemania (5.407 MW) y China (2.641 MW), ver Figura 4. Cerca del 88% de los parques marinos están instalados en las costas de países europeos. El Reino Unido se encuentra en la primera posición con un 37,24 % del total, seguido de Alemania con un 29 %.

Si analizamos la estadística por zonas marinas, el Mar del Norte concentra, con mucha diferencia, la mayoría de la potencia instalada offshore, esto es, el 82,8 % del total. Este dato es coherente con el reparto por países, dado que los países del norte de Europa: Dinamarca, Alemania, y en especial Reino Unido, son los países que mayor potencia instalada poseen. En segunda posición se encuentra el Mar de China, cuya potencia instalada proviene sobre todo de los aerogeneradores chinos, como puede verse en Tabla 1. La capacidad eólica instalada off-shore solamente en 2017 representó el 23,5 % de la capacidad acumulada global, duplicando la tasa de crecimiento con respecto a 2016.

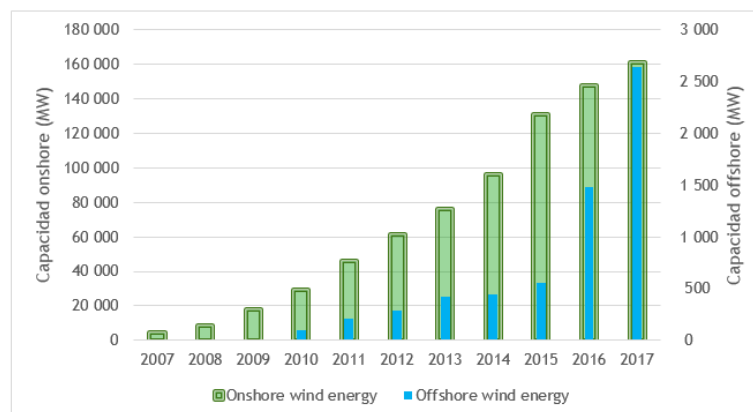
Tabla 1. Clasificación de capacidad acumulada Eólica offshore por áreas marinas.

Área geográfica	Capacidad Eólica offshore acumulada (MV)	Área geográfica	Capacidad Eólica offshore acumulada (MV)
Mar Báltico	295	Mar Céltico	2
Mar de Irlanda	25	Océano Atlántico	29
Mar del norte	15.510	Océano Pacífico	2.859

Figura 4. Clasificación de capacidad eólica offshore acumulada en MW por países.
Fuente: IRENA, 2018. Elaboración propia



Figura 5. Evolución del sector Eólico en China.
Fuente: IRENA, 2018. Elaboración propia



3. ESCENARIO. PRINCIPALES PAÍSES

3.1 China

China es el país con más capacidad instalada de energía eólica del mundo con 188,392 GW, a pesar de que el ritmo de crecimiento ha disminuido se instalaron 19. 660 GW durante el año 2017, ver Figura 5. La capacidad conectada a la red aumentó a 164.000 MW con el incremento de 15.030 MW durante 2017. La electricidad generada ascendió a 305,7 TWh, representando un aumento del 26,3% respecto al año anterior. La energía eólica sigue

siendo la tercera fuente de generación del país, seguidos de las fuentes térmicas e hidroeléctricas. (Chinese Wind Energy Association [CWEA], 2018; Juhua Y., Yuan Ch., Lixiao Z., Yan H., Qin Y. & Changbo W, 2018). En 2017, el gobierno chino dictó un nuevo marco de regulación energético para promover el desarrollo de la energía eólica distribuida. El objetivo con vistas al 2020, es alcanzar los 210 GW de capacidad total.

3.2 EEUU

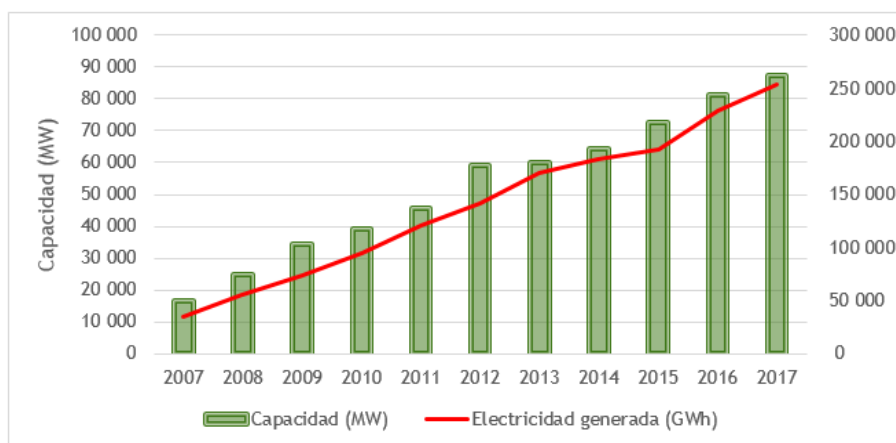
El sector eólico estadounidense añadió 7,017 GW durante el 2017, incrementando su capacidad total en 89,077 GW, consolidando a la energía eólica como la primera fuente renovable de generación de energía eléctrica del país, apoyadas por la disminución de costes y las políticas federales y estatales. El recurso eólico suministra el 6,3 % de la demanda de energía eléctrica del país. La evolución en la última década de tecnología en tierra es creciente, generando 254 TWh de energía eléctrica. La capacidad eólica marina durante el 2017 se mantuvo en sus 29 MW de capacidad total ver Figura 6. Los objetivos a largo y corto plazo son optimistas, se espera suministrar el 10% de la demanda eléctrica nacional a partir del viento para el 2020, 20 % para 2030 y 35 % para 2050. Incrementar la capacidad total en 35 GW y 248.000 empleos (U.S. Department of Energy, 2015; Navigant Consulting. INC, 2017).

3.3 Unión Europea

Alemania lidera los mercados europeos al añadir 6,76 GW de potencia eólica instalada durante el 2017, representando un 15 % más que en 2016, totalizando su capacidad en 55,8 GW, respaldada por la transición energética alemana. Se produjeron 107,61 TWh de energía eléctrica en 2017 a partir de la energía eólica, un 36,9% con respecto a 2016. La evolución del sector eólico es en general ascendente, el incremento en la eólica marina es bastante más notable, el crecimiento en 2017 comparado con el año 2015 es de 64,7%. [Figura 7A]. Los mayores parques eólicos offshore se encuentran en el mar de norte. Se espera que la capacidad eólica marina alcance los 15 GW para 2030, que contribuirá al objetivo general de proporcionar entre un 55% y un 60% de electricidad renovable para 2035 y al menos un 80% para 2050. (Federal Ministry of Justice and Consumer Protection BMJV, 2017).

Francia estableció un nuevo record para el desarrollo de la industria eólica en 2017, con un 1,6 GW de potencia añadida, logrando una capacidad total de 13,5 GW.

Figura 6. Evolución del sector Eólico en EEUU.
Fuente: IRENA, 2018. Elaboración propia



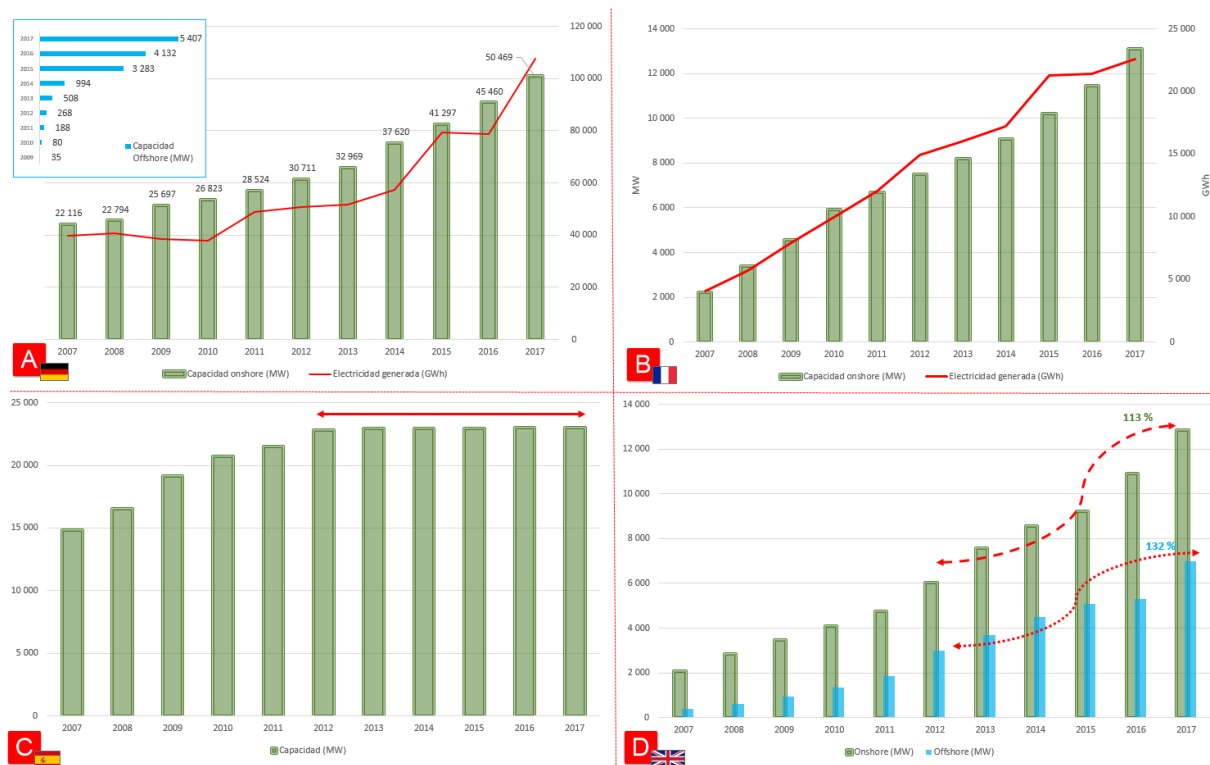
La producción anual de energía eléctrica a partir del viento fue de 22.6 TWh, con un aumento de 5,6 % con respecto al 2016. [Figura 7B]. La energía eólica proporcionó aproximadamente el 28% de la capacidad total de energía renovable instalada en Francia, que ascendió a 48,7 GW a finales de 2017. Con mirada a largo plazo, 2023, se espera un incremento de hasta 26 GW en potencia eólica terrestre y de 3 GW para la marina. Las licitaciones para parques eólicos flotantes se anunciaron en 2017, siguiendo los proyectos piloto de parques eólicos actuales.

La capacidad eólica terrestre instalada en **España** ascendió a 23,092 GW en 2017, durante ese año la potencia instalada fue de 96 MW, generando una producción de energía eléctrica de 47,7 TWh. Las inversiones nacionales para I+D relacionadas con la energía eólica totalizaron 13,2 millones de euros.

La evolución es creciente hasta el año 2012, pero a partir de este periodo permanece casi constante. Después de la reforma del sector eléctrico español en 2012, la incertidumbre regulatoria llevó a una reducción dramática en los nuevos proyectos hasta 2016, cuando el gobierno estableció subastas basadas en inversiones de descuento en costos. [Figura 7C]. El objetivo del Plan para 2020 fue de 35 GW; hasta el momento, se han adjudicado 4.6 GW en tres subastas (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), 2011).

Se espera que el próximo año, con el nuevo Plan Estatal de Investigación e Innovación Científica y Técnica 2017-2020, el número de propuestas aumentará y se iniciará un mayor número de proyectos tanto en tierra como en mar.

Figura 7. Evolución del sector Eólico. A-Alemania, B-Francia, C-España, D-Reino Unido.
Fuente: IRENA, 2018. Elaboración propia



El **Reino Unido** estableció nuevos records para la potencia eólica en tierra y mar en el año 2017 con capacidades totales de 19,836 GW y 6,975 GW respectivamente. La capacidad instalada fue de 1,682 GW para la eólica marina y 1,938 GW para la terrestre, la electricidad generada por el viento alcanzó el 14,2% de la electricidad del Reino Unido. La evolución es creciente en ambas tecnologías eólicas, en cinco años la capacidad de energía eólica terrestre aumentó en un 113 % y la eólica marina un 132 % [Figura 7D].

La participación promedio anual de la energía eólica fue del 50% de la electricidad generada a partir de las renovables y alcanzó el 61% en el último trimestre de 2017. Se esperan resultados muy positivos con la nueva estrategia “Clean Growth” dictada en octubre del 2017, se invertirá 627 millones de euros en proyectos de electricidad renovable principalmente en eólica marina (Government Digital Service UK, 2017).

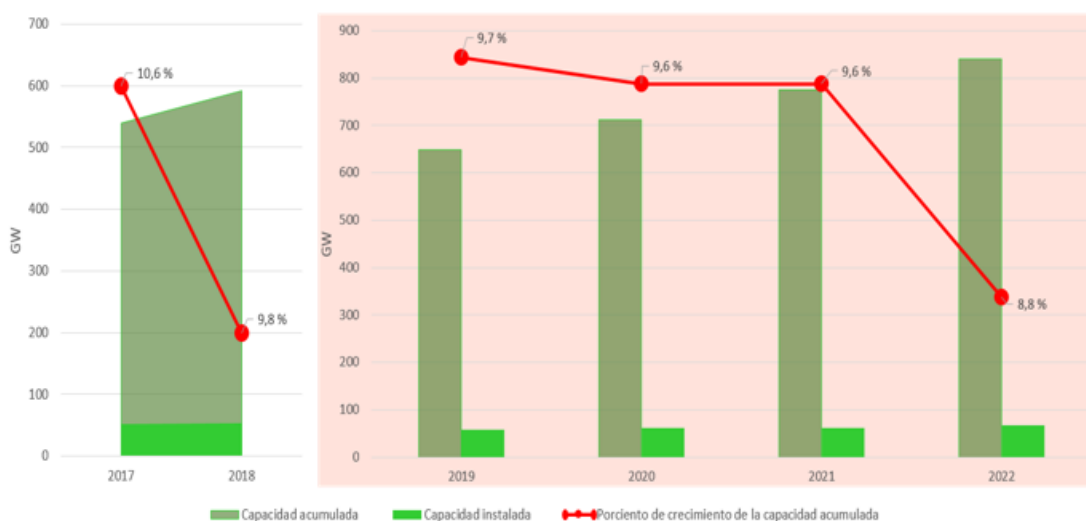
4. PREVISIONES DE INTEGRACIÓN DEL RECURSO EÓLICO

4.1 Horizonte a corto plazo 2018-2022

El mercado anual global retornará al estado creciente durante el 2019 y 2022, rompiendo la barrera de los 60 GW de capacidad instalada, y esperando alcanzar los 840 GW para finales del 2022. El grado de crecimiento entre 2019 y 2022 se incrementará, pero a un ritmo más lento que a principio de la década, ver Figura 8. Las predicciones por regiones según fuentes de GWEC (Global Wind Energy Council [GWEC], 2018), estarán lideradas por Asia con 370,4 GW de capacidad total instalada, en segundo lugar, Europa con 253,8 GW seguidas de Norteamérica, América Latina, Oriente Medio-África y la zona del Pacífico con 158,9 GW, 34,1 GW, 13,7 GW y 9,9 GW respectivamente, ver Figura 9.

Asia será quien lidere el mercado Eólico, teniendo al frente China con la inclusión de parque eólicos terrestres y un gran impulso a la tecnología marina. La reforma del sistema eléctrico, con la introducción de un sistema enfocado a las energías renovables sustituyendo al sistema tradicional se encuentra en proceso, impulsando la transición energética del país. India sigue sumando GW a la región y se espera añadir 60 GW en el 2022. Otros países de la región como Japón, Korea, Pakistán, Filipinas, Vietnam y Tailandia aportarán GW de manera más lenta.

Figura 8. Pronóstico de la capacidad de energía eólica a corto plazo.
Fuente: Global Wind Energy Council [GWEC], 2018. Elaboración propia



Norte América, con Estados Unidos sumando GW, una fuerte política de medidas enfocadas a las energías renovables, así como las constantes inversiones en investigación eólica, hacen el mercado eólico competitivo y fuerte mundialmente. La inclusión en el mercado eólico marino proporcionará nuevas cifras para el 2022.

En América Latina destacan países como Brazil con grandes expectativas en cuanto a número de instalaciones previstas para el periodo 2019-2022, así como Argentina, Uruguay y Chile. En África se espera la culminación de la línea de transmisión en Kenia y nuevas instalaciones en Marruecos, se espera que Egipto, con grandes recursos eólicos, cambien las políticas energéticas en aras de avanzar. Dentro del Pacífico, Australia será el mayor impulsor del mercado.

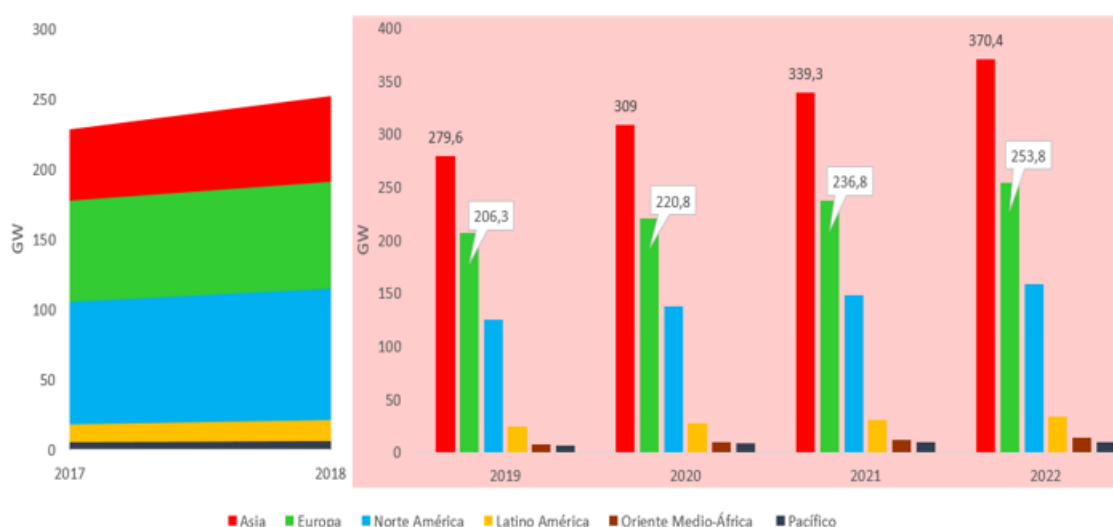
4.2 Objetivos europeos 2020-2030

Europa se encuentra alineada con los objetivos marcados por la comisión europea para el 2020 (20%) y 2030 (32%), en 2016 el grado del cumplimiento era del 17 %. (Eurostat,2018; European Commission – Statement, 2018)

La energía eólica podría proveer el 16,5 % de la energía de Europa en 2020 y el 30 % en 2030, obteniendo la cifra de 323 GW de potencia instalada, incluyendo la repotenciación de los parques eólicos que culminan su vida útil antes de 2030. La mayor potencia instalada para el 2030 la tendría Alemania con 85 GW, seguidos de Francia, Reino Unido y España con 43 GW, 38 GW y 35 GW respectivamente. Dinamarca, Irlanda, Estonia y los países bajos suministrarán más del 50 % de su electricidad a partir de energía eólica. Estas cifras representan una contaminación evitada de 382 millones de toneladas de CO₂ y 13 billones de euros de combustible fósil importado. (Wind Europe, 2017)

Europa estará al frente de la eólica marina, con Alemania y Reino Unido encabezando la lista. Según las últimas licitaciones se espera duplicar las instalaciones actuales de alta mar para finales del 2022.

Figura 9. Pronóstico de la capacidad de energía eólica a corto plazo por regiones.
Fuente: GWEC. 2018. Elaboración propia



4.3 Escenario 2DS

La transformación del sistema de energía debe ser radical, para lograr el ambicioso escenario 2DS que vincula un sistema energético a una reducción de las emisiones de CO₂ con el objetivo de obtener al menos, un 50% de probabilidad de limitar el aumento de la temperatura global promedio a 2°C en 2100. Más del 20 % de la electricidad mundial debería tener un origen eólico en 2060 para lograr estos objetivos. Entre 2020 y 2025 la capacidad eólica marina necesita triplicarse y la capacidad eólica terrestre aumentar 1,7 veces para cumplir con el escenario 2DS. (International Energy Agency [IEA], 2018)

Hasta finales de 2017 los países miembros produjeron 883 TWh de electricidad generada por el viento en tierra, contribuyendo con un 86% al 2DS de la producción de objetivos eólicos en tierra a nivel mundial. La generación de electricidad a partir de energía eólica marina representó el 87 % de la producción objetivo de energía eólica marina 2DS, por lo tanto, el crecimiento de las instalaciones mundiales muestra un optimismo discreto para el cumplimiento de los objetivos 2DS.

5. BARRERAS A VENCER EN LA INDUSTRIA EÓLICA

A pesar del avance exponencial de esta industria en los últimos años, existen barreras a vencer para cumplir con los planes de energías renovables. Las podemos categorizar en cuatro grupos: Aprovechamiento del recurso eólico, Tecnológicas, Integración y Sociales, ambientales y educativas.

5.1 Aprovechamiento del recurso eólico

Los modelos actuales de diseños de parques eólicos con frecuencia conducen a predicciones erróneas de producción de energía y, por lo tanto, incertidumbre en el rendimiento y viabilidad de parques eólicos, lo que origina grandes pérdidas financieras. Organizaciones y empresas del sector, universidades e investigadores trabajan con el objetivo de desarrollar nuevas metodologías de optimización en la selección y evaluación de emplazamientos.

IEA Wind, con la colaboración de 10 países, en la tarea 31("Wakebench") desarrolla un sistema de verificación y validación para mejorar los modelos de parques eólicos, cuantificación de incertidumbre y procedimientos enfocados a las buenas practicas. (International Energy Agency Wind [IEA WIND], Task 31, 2019). Uno de los proyectos principales es la creación de un nuevo atlas eólico europeo (NEWA), basado en los modelos optimizados de flujo atmosférico, series de datos de largo plazo y las buenas practicas con resultados de alta resolución espacial. Cubre todo el continente europeo y zonas marítimas de 100 km además del mar del Norte y Báltico. (New European Wind Atlas [NEWA], 2019)

Otros investigadores han desarrollado diferentes modelos de optimización de evaluación de emplazamientos, basados no solamente en el aprovechamiento del recurso eólico, incluyen otros factores como son: sociales, económicos, medioambientales, políticos etc, donde combinan los sistemas de información geográficos con herramientas de Soft Computing. (Ali S, Gaona G, Taweekun J, Techato K, Waewsak J & Gyawali S, 2018; Díaz Cuevas P, 2018; Ayodelea T.R, Ogunjuyigbea A.S.O, Odigie O & Munda J.L. 2018; Sinem Değirmenci S & Bingöl F, Sofuoglu S.C, 2018; Ahmed Solangi Y, Tan Q, Waris Ali Khan M, Hussain Mirjat N & Ahmed I, 2018; Rezaei M, Mostafaeipour A, Qolipour M & Tavakkoli-Moghaddam R, 2018; Sanchez-Lozano J.M, García-Cascales M.S & Lamata M.T, 2016).

Otra barrera importante relacionada con el aprovechamiento del recurso eólico son las dificultades relacionadas con las mediciones del propio recurso eólico, para mitigarlo IEA Wind con la colaboración de 13 países, presenta la tarea 32. ("Lidar"), donde provee de una tecnología remota como alternativa a las técnicas de medición tradicionales. Incluye varias aplicaciones: Evaluación de sitios, Control y carga, Rendimiento etc. Se estudian mediciones tanto en tierra como en mar. (IEA WIND. Task 32, 2019)

Igual de importante es conocer el pasado del recurso eólico como los pronósticos futuros para predecir la energía eólica, en este concepto IEA Wind con la participación de 13 países, incluye la tarea 36. ("Forecasting for wind energy") donde se investiga y mejoran los modelos de predicción numérica, se analizan la incertidumbre de modelos y se optimizan los procesos de pronósticos. (IEA WIND. Task 36, 2019)

5.2 Tecnológicas

El avance tecnológico en la industria eólica ha tenido un crecimiento acelerado en la última década, las empresas tecnológicas del sector han logrado cambios significativos en los modelos de aerogeneradores tanto terrestres como marítimos, desde el diámetro del rotor, la altura del buje y potencia hasta las investigaciones de aerogeneradores para climas muy fríos, como es el caso de la tarea 19 ("Wind energy in cold climates") de IEA Wind, con la participación de 11 países culminada en 2018, demostrando la posibilidad de expansión a gran escala de parques eólicos en este tipo de clima de manera viable y con el aprovechamiento del recurso eólico elevado de la zona. (IEA WIND. Task 19, 2019).

En la actualidad y enfocados al futuro, existen investigaciones en cuanto a la mejora continua de modelos de aerogeneradores terrestres y marinos. IEA Wind en la tarea 29 ("Analysis of wind tunnel measurements and improvement of aerodynamic models"), con la participación de 9 países, trabaja con el objetivo de mejorar y validar modelos aerodinámicos en climas de alta turbulencia y los efectos aeroelásticos. Las mediciones se realizarán en turbinas a tamaño real evitando el escalado de datos. (IEA WIND. Task 29, 2019). Con respecto a los aerogeneradores marítimos, IEA Wind en la tarea 30 ("Offshore code comparison collaboration, continued, with correlation (OC5)"), que culmina en 2018 y se extiende a OC6 hasta el 2022, con la participación de 13 países, trabaja en la optimización de modelos eólicos marinos validando la influencia de cargas hidrodinámicas, la capacidad aerodinámica bajo la acción del movimiento etc. con el objetivo de adaptarlos a condiciones físicas reales tanto para sistemas flotantes como de estructura fija. (IEA WIND. Task 30, 2019)

La universidad de Maine, Estados Unidos, organización que participa en la anterior tarea, ha desarrollado un nuevo diseño de plataforma de turbina eólica flotante llamado VoltturnUS, utiliza materiales innovadores de construcción con el objeto de reducir los costes de energía eólica marina. Se espera su comercialización a partir del 2020. (Viselli A.M, Goupee A J & Model Dagher H.J, 2015; University of Maine, 2019)

Una preocupación social en cuanto a la energía eólica es el impacto del nivel de ruido de los aerogeneradores, con el objetivo de minimizarlos IEA Wind ha creado una nueva tarea que comienza su andadura en el 2018, tarea 39 ("Quiet Wind Turbine Technology"), las funciones principales son la creación de estándares internacionales en las regulaciones del nivel de ruido para aumentar la efectividad de la tecnología de aerogeneradores silenciosos. (IEA WIND. Task 39, 2019). Existen aerogeneradores orientados a barlovento ("upwind") y a sotavento ("downwind"), el modelo más estandarizado es a barlovento, IEA Wind en su tarea 40 ("Downwind turbine technologies") investiga los beneficios de este tipo de aerogeneradores y su aplicación en áreas de fuertes vientos. (IEA WIND. Task 40, 2019).

5.3 Integración

La integración de la energía eólica al sistema eléctrico mundial es una tarea prioritaria para alcanzar los objetivos esperados del recurso eólico. IEA Wind, en la tarea 25 (“Power Systems with Large Amounts of Wind Power”), con la participación de 17 países, analiza y desarrolla una metodología para evaluar el impacto de la energía eólica en los sistemas de energía, conjuntamente lleva a cabo casos de integración en la red con sistemas integrados de diferentes combinaciones de energías renovables eólico-fotovoltaico. (IEA WIND. Task 25, 2019). Investigadores independientes analizan metodologías de investigación de integración eólica con otros orígenes renovables como solar. (Chen W, Zhu Y, Yang M & Yuan J, 2017; Wu Y & Geng S, 2014) y biomasa (Pérez-Navarro A, Alfonso D, Álvarez C, Ibañez F, Sánchez C & Segura I, 2010).

5.4 Sociales, ambientales y educativas

La aceptación social y los efectos ambientales de la energía eólica son barreras importantes en el desarrollo de proyectos de energía eólica ya que disminuye el despliegue planificado de parques ya sean terrestres o marítimos. IEA Wind, en la tarea 28 (“Social acceptance of wind energy projects”), con la participación de 8 países, trabaja en la creación de conocimiento, elaboración de procesos regulatorios y regímenes de consentimiento para promover la aceptación social, dando prioridad a la aceptación social de los parques eólicos marinos. (IEA WIND. Task 28, 2019). La tarea 34 de IEA Wind (“WREN- Working together to resolve environmental effects of wind energy”) tiene como objetivo mostrar en diferentes tecnologías de información el desarrollo continuo de publicaciones científicas relacionadas con la reducción de impactos en la fauna tanto en instalaciones terrestres como marítimas. Otra iniciativa es la creación de WREN Hub, que contiene una recopilación de información sobre estructuras regulatorias, efectos ambientales y estrategias para mitigar y minimizar los impactos ambientales etc. (IEA WIND. Task 34, 2019).

6. Conclusiones

Las perspectivas de la energía eólica son ambiciosas y prometedoras. Podemos afirmar que, dentro de las energías renovables, la energía eólica es el origen de la energía eléctrica con mayor nivel de desarrollo en la actualidad principalmente debido a la madurez tecnológica alcanzada y al abaratamiento de sus costes. Las cifras así lo demuestran: la capacidad acumulada a finales del 2017 asciende 539,123 GW, se sumaron 46,059 GW durante este año, generando 1.430 TWh de electricidad. El crecimiento en la última década es de casi un 470 %. China lidera el mercado eólico en tierra con 13,917 GW y el Reino Unido la eólica marina con 6,975 GW, el Mar del Norte centraliza la potencia instalada offshore, el 82,8 % del total. Los objetivos marcados por la comisión europea para el 2020-2030 con un 20 % y un 32% respectivamente, de energía consumida con origen renovable, logran un impacto positivo en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y dependencia energética. Las predicciones son optimistas en la industria eólica, se mantiene el ritmo creciente a corto plazo, se espera alcanzar los 840 GW para finales de 2022 con Asia al frente seguida de la Unión Europea. A pesar de esto, existen retos importantes de alcanzar para desarrollar a gran escala esta tecnología y consolidar su integración con los sistemas eléctricos, es imprescindible el desarrollo de nuevas metodologías de optimización en la selección y evaluación de emplazamientos, integrar sistemas combinados de energía eólica con otras fuentes de energías renovables como la solar o la biomasa, así como mitigar los efectos ambientales e impulsar la aceptación social. El hemisferio Norte concentra los países de mayor desarrollo eólico; China, EEUU, Reino Unido, Alemania, India, España entre otros. ¿Es mayor el recurso eólico en este hemisferio? No es una cuestión climatológica, las políticas energéticas marcadas en estos países han fomentado el desarrollo vertiginoso de esta tecnología.

7. Referencias bibliográficas

- Ahmed Solangi Y, Tan Q, Waris Ali Khan M, Hussain Mirjat N & Ahmed I. (2018). The Selection of Wind Power Project Location in the Southeastern Corridor of Pakistan: A Factor Analysis, AHP, and Fuzzy-TOPSIS Application. *Energies* ; 11 (8), 1940. <https://doi.org/10.3390/en11081940>
- Ali S, Gaona G, Taweekun J, Techato K, Waewsak J & Gyawali S. (2018). GIS based site suitability assessment for wind and solar farms in Songkhla, Thailand. *Renewable Energy Reviews*; 132: 1360– 1372. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.09.035>
- Ayodele T.R, Ogunjuyigbe A.S.O, Odigie O & Munda J.L. (2018). A multi-criteria GIS based model for wind farm site selection using interval type-2 fuzzy analytic hierarchy process: The case study of Nigeria. *Applied Energy* 228:1853-1869. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.07.051>
- Chen W, Zhu Y, Yang M & Yuan J. (2017). Optimal Site Selection of Wind-Solar Complementary Power Generation Project for a Large-Scale Plug-In Charging Station. *Sustainability* , 9, 1994; <https://doi.org/10.3390/su9111994>
- Chinese Wind Energy Association (CWEA). Obtenido el 30 de diciembre de 2018, desde <http://www.cwea.org.cn>
- Díaz Cuevas P. (2018). GIS-Based Methodology for Evaluating the Wind-Energy Potential of Territories: A Case Study from Andalusia (Spain). *Energies*. 11 (10) 2789. <https://doi.org/10.3390/en11102789>
- European Commission - Statement. (2018). Europe leads the global clean energy transition: Commission welcomes ambitious agreement on further renewable energy development in the EU. Obtenido de http://europa.eu/rapid/press-release_STATEMENT-18-4155_en.htm
- Eurostat. (2018). Share of renewables in energy consumption in the EU reached 17% in 2016. Obtenido de <https://ec.europa.eu/eurostat/documents/2995521/8612324/8-25012018-AP-EN.pdf/9d28caef-1961-4dd1-a901-af18f121fb2d>
- Federal Ministry of Justice and Consumer Protection BMJV. (2017). Gesetz zur Entwicklung und Förderung der Windenergie auf See (Windenergie-auf-See-Gesetz - WindSeeG). Obtenido de https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/E/windseeg-gesetz-en.pdf?__blob=publicationFile&v=9
- Global Wind Energy Council (GWEC). 2018. Global Wind Report. Annual Market Update 2017. Obtenido de <https://gwec.net/policy-research/reports/>
- Government Digital Service UK. (2017). The Clean Growth Strategy. Obtenido de <https://www.gov.uk/government/publications/clean-growth-strategy>
- Hoehne C.G. & Chester M.V. (2017). Greenhouse gas and air quality effects of auto first-last mile use with transit. *Transportation Research Part D* 53 306–320. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.04.030>
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). (2011). The Spanish Renewable Energy Plan 2011-2020. Obtenido de <http://www.idae.es/tecnologias/energias-renovables/plan-de-energias-renovables-2011-2020>
- International Energy Agency (IEA). (2018). IEA Energy Technology Perspectives 2017 – Catalysing Energy Technology Transformations. ISBN: 9789264275973. Obtenido de http://dx.doi.org/10.1787/energy_tech-2017-en
- International Energy Agency Wind (IEA WIND). (2018). Technology Collaboration Programme. 2017 Annual Report. PWT Communications Inc. United States. ISBN: 978-0-9905075-8-1
- International Energy Agency Wind (IEA WIND). Task 19. Wind energy in cold climates. Obtenido el 02 de enero de 2019, desde <https://community.ieawind.org/task19/home>
- International Energy Agency Wind (IEA WIND). Task 25. Power Systems with Large Amounts of Wind Power. Obtenido el 03 de enero de 2019, desde <https://community.ieawind.org/task25/home>
- International Energy Agency Wind (IEA WIND). Task 28. Social Acceptance of Wind Energy Projects. Obtenido el 03 de enero de 2019, desde <https://community.ieawind.org/task28/home>
- International Energy Agency Wind (IEA WIND). Task 29 Analysis of wind tunnel measurements and Improvement of aerodynamic models. Obtenido el 02 de enero de 2019, desde <https://community.ieawind.org/task29/home>
- International Energy Agency Wind (IEA WIND). Task 30. Offshore Code Comparison Collaboration Continued, with Correlation (OC5). Obtenido el 03 de enero de 2019, desde <https://community.ieawind.org/task30/home>
- International Energy Agency Wind (IEA WIND). Task 31. Wakebench. Obtenido el 02 de enero de 2019, desde <https://community.ieawind.org/task31/home>

International Energy Agency Wind (IEA WIND). Task 32. Lidar. Obtenido el 02 de enero de 2019, desde <https://community.ieawind.org/task32/home>

International Energy Agency Wind (IEA WIND). Task 34. Environmental (WREN). Obtenido el 03 de enero de 2019, desde <https://community.ieawind.org/task34/home>

International Energy Agency Wind (IEA WIND). Task 36. Forecasting for wind energy. Obtenido el 02 de enero de 2019, desde <https://community.ieawind.org/task36/home>

International Energy Agency Wind (IEA WIND). Task 39. Quiet Wind Turbine Technology. Obtenido el 03 de enero de 2019, desde <https://community.ieawind.org/task39/home>

International Energy Agency Wind (IEA WIND). Task 40. Downwind Turbine Technologies. Obtenido el 03 de enero de 2019, desde <https://community.ieawind.org/task40/home>

International Renewable Energy Agency (IRENA). (2018), Global Energy Transformation: A roadmap to 2050, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. Obtenido de <http://www.irena.org/publications>

Juhua Y., Yuan Ch., Lixiao Z., Yan H., Qin Y. & Changbo W. (2018). The life-cycle energy and environmental emissions of a typical offshore wind farm in China. *Journal of Cleaner Production* 180 316-324. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.082>

Navigant Consulting. INC. (2017). Economic Development Impacts of Wind Projects. Obtenido de <http://awea.files.cms-plus.com/Economic%20Development%20Impacts%20of%20Wind%20Projects%202017%20FINAL.pdf>

New European Wind Atlas (NEWA). Obtenido el 02 de enero de 2019, desde <http://www.neweuropeanwindatlas.eu/>

Pérez-Navarro A, Alfonso D, Álvarez C, Ibañez F, Sánchez C & Segura I. (2010). Hybrid biomass-wind power plant for reliable energy generation. *Renewable Energy*, 35 (2010) 1436–1443. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.12.018>

Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (REN21) (2018). *Renewables 2018 Global Status Report*. (Paris: REN21 Secretariat). ISBN 978-3-9818911-3-3.

Rezaei M, Mostafaeipour A, Qolipour M & Tavakkoli-Moghaddam R. (2018). Investigation of the optimal location design of a hybrid wind-solar plant: A case study. *International journal of hydrogen energy* ; 43 100-114. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.10.147>

Sanchez-Lozano J.M, García-Cascales M.S & Lamata M.T. (2016). GIS-based onshore wind farm site selection using Fuzzy Multi-Criteria Decision Making methods. *Evaluating the case of Southeastern Spain. Applied Energy Reviews*; 171: 86-102. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.03.030>

Sinem Değirmenci S, Bingöl F & Sofuoğlu S.C. (2018). MCDM analysis of wind energy in Turkey: decision making based on environmental impact. *Environmental Science and Pollution Research*; 25:19753–19766. <https://doi.org/10.1007/S11356-018-2004-4>

U.S. Department of Energy. (2015). *Wind Vision: A New Era for Wind Power in the United States*. Obtenido el 15 de noviembre de 2018, desde <https://www.energy.gov/eere/wind/wind-vision>

University of Maine. Floating Offshore Wind in Maine. Advanced Structures & Composites Center. Obtenido el 03 de enero de 2019, desde <https://composites.umaine.edu/offshorewind/>

Viselli A.M, Goupee A J & Model Dagher H.J. (2015). Test of a 1:8-Scale Floating Wind Turbine Offshore in the Gulf of Maine 1. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. 137 (4). <https://dx.doi.org/10.1115/1.4030381>

Wind Europe. (2017). *Wind energy in Europe: Outlook to 2020*. Obtenido de <http://fee.asso.fr/wp-content/uploads/2017/09/WindEurope-Midterm-Outlook-V4.pdf>

Wind Europe. (2017). *Wind energy in Europe: Scenarios for 2030*. Obtenido de <http://fee.asso.fr/wp-content/uploads/2017/09/Wind-energy-in-Europe-Scenarios-for-2030.pdf>

Wu Y & Geng S . (2014). Multi-criteria decision making on selection of solar–wind hybrid power station location: A case of China. *Energy Conversion and Management* ; 81 527-533. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2014.02.056>

Zerta, M. (2008). Alternative world energy Outlook (AWEO) and the role of hydrogen in a changing energy landscape. *International Journal of Hydrogen Energy* 33(12),3021–3025. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.01.044>